



TITLE:

# ヒノキ林における樹体貯熱量の推定

AUTHOR(S):

和田, 卓己; 谷, 誠; 小杉, 緑子; 高梨, 聡

---

CITATION:

和田, 卓己 ...[et al]. ヒノキ林における樹体貯熱量の推定. 森林研究 2002, 74: 69-76

ISSUE DATE:

2002-12-10

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/192853>

RIGHT:

## 論 文

## ヒノキ林における樹体貯熱量の推定

和田卓己\*・谷 誠\*・小杉緑子\*・高梨 聡\*

Estimation of biomass heat storage in a Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) forest

Takumi WADA\*, Makoto TANI\*, Yoshiko KOSUGI\*, Satoru TAKANASHI\*

滋賀県桐生水文試験地において、ヒノキ林の樹体貯熱量の推定を行った。まず、樹幹温度の実測を行い、熱伝導方程式に表面温度を境界条件として与えて、内部温度を解析し、熱拡散係数の最適化を行った。解析結果は、樹幹内温度をほぼ良好に再現したので、樹幹表面における貯熱量を計算し、これを群落全体に拡張して、ヒノキ林における植物体の貯熱量を求めた。貯熱量の日較差は最大で約25W/m<sup>2</sup>、純放射量に対する割合は約5%であった。また、群落貯熱量（顕熱・潜熱・土壌）全体の純放射量に対する割合は約12%であった。さらに、気温から植物体貯熱量を推定する2つのパラメータ化手法として、樹体表面温度の代わりに測定しやすい林内気温を熱伝導方程式に与えて貯熱量を推定する方法、樹冠上の気温の時間変動から簡易に推定する方法を提示した。

キーワード：貯熱量、熱収支、バイオマス、樹幹温度

Biomass heat storage was estimated in a *Chamaecyparis obtusa* forest in Kiryu Experimental Watershed, Shiga Prefecture, Japan. An application of heat conduction equation to a cylinder agreed with the inner temperature distribution of a tree stem, and the thermal diffusivity was successfully optimized. The result was scaled from the measured tree stem up to biomass heat storage of the forest using tree dimension data. Daily fluctuation range of the heat storage was approximately 25W/m<sup>2</sup>, corresponding to 5% of the net radiation, and the total storage including biomass, sensible, latent and soil heat storage terms was equivalent to its 12% portion. Two parameterizations for biomass heat storage were presented based on air temperature records: one method was to estimate the storage using in-forest air temperature instead of stem surface temperature as the surface boundary layer of heat conductance equation, and the other was to simply calculate it from the temporal gradient of air temperature at the reference height above canopy.

Key words: heat storage, energy budget, biomass, stem temperature

## 1. はじめに

近年、気候変動の解明のために様々な地表面観測が各地で行われているが、その中で従来からの一般気象観測の項目以外に地表面フラックス（単位時間に単位面積を通して流れる熱や物質の量）の測定が多く行われるようになってきている。そのようなフラックス測定の対象地として見たとき、森林は耕作地・草地などに比べ地上バイオマスが大きいと、特に植物体の温度変化にエネルギーが費やされるため、森林熱収支の特徴を考えると貯熱量のうち特に植物体の貯熱量が重要となる。例えば、熱収支やCO<sub>2</sub>フラックスの長期モニタリングにおいて、顕熱・潜熱の観測値の合計が放射エネルギーの観測値を下回るという問題が指摘されているが、そこでは植物体の貯熱量が重要な評価項目の1つとして位置付けられている（Baldocchiら（1996））。

また、田中ら（1998）、矢野（2002）は森林における

フラックスを詳しく説明するため、多層モデルを組み立て森林内外の熱・水蒸気・CO<sub>2</sub>の輸送を解析した。しかし、これらのモデルにおいては植物体の貯熱が考慮されていないので、今後このようなモデルの精度を上げるためにも植物体の貯熱を取り入れる必要がある。

この植物体の貯熱については、例えば渡辺ら（1998）、Mooreら（1986）などの研究があり、いくつか植物体貯熱量の推定法があるが、それらの手法に対する評価は定まっていない。

そこで、本研究では各種微気象観測の行われている桐生のヒノキ林で、植物体内の温度の測定、毎木調査を行い、貯熱量の推定を行うとともに、貯熱量の気温からの簡易測定手法の適用性を検討することにした。

\* 京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻

\* Division of Environmental Science and Technology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

## 2. 方法

### 2.1. 測定項目

観測は滋賀県南部に位置する桐生水文試験地（北緯34度58分，東経136度0分）内に設置された，高さ28mの微気象観測タワーを中心としてほぼ三角形のプロット（約1200m<sup>2</sup>）を設け，その中のヒノキを対象に2001年9月5日に開始した．同水文試験地の2001年における平均気温は13.2℃，降水量は1437.6mmであった．植生は主にヒノキで，その葉面積指数（LAI）は4.91であった．

測定項目は林内気象要素として気温と相対湿度，土壌の貯熱量，そして測定木の樹幹表面温度，樹幹内部温度である．また，プロット内の胸高以上の樹木については毎木調査を行い樹種を同定し，樹高（m），DBH（cm）を測定した．

気温と湿度は高さ1m，4m，10m，20mの各点について，微気象観測タワーに設置した通風式静電容量湿度計によって，土壌の貯熱量は地中熱流板によって測定した．植物体温度の測定木としては，微気象観測タワーに隣接したヒノキ（樹高：18.5m，DBH：20.8cm）を用いた．樹幹表面温度と樹幹内部温度については測定木の高さ1mと10mについて銅-コンスタンタン熱電対を用いて測定した．なお実際には樹皮と木部で熱物理定数が異なると考えられるため，樹幹表面温度として樹皮下の温度を用いることとした．そして，樹幹内部温度については高さ1m（半径10.8cm）では深さ1cm，2.5cm，6cm，9cmの4点について，高さ10m（半径7.8cm）では深さ1cm，2.5cm，6cmの3点について，樹幹に熱電対を挿入することによって測定した．以上のデータのうち熱電対で測定したものに関しては，1分ごとのデータを15分平均したものをを用いた．

### 2.2. 貯熱量推定手順

植生地における熱収支は

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

と表される．ここで， $R_n$ は純放射量， $LE$ は潜熱輸送量（水の気化潜熱×蒸発量）， $H$ は顕熱輸送量， $G$ は群落貯熱量であり，単位はいずれもW/m<sup>2</sup>である．

さらに，群落貯熱量 $G$ は，次の成分から構成される．

$$G = Q_g + Q_a + Q_w + Q_v \quad (2)$$

ここで， $Q_g$ は土壌内の貯熱量， $Q_a$ は植被層内大気の見熱貯熱量， $Q_w$ は植被層内大気の潜熱貯熱量， $Q_v$ は植物体貯熱量である．

本論文では $Q_v$ を次の手順によって推定した．

- ①植物体の表面、内部の温度を実測する．
- ②熱伝導方程式に表面温度を境界条件として与え，内部

温度を計算する．

- ③②の結果と実測値を比較し熱拡散係数 $K$ を最適化する．

- ④任意の半径を持った樹幹の貯熱量を， $K$ を与えて熱伝導方程式を用いて計算によって求める．

- ⑤④と毎木調査の結果から植物体の貯熱量 $Q_v$ を求める．

### 2.3. 貯熱量解析の基礎式

樹幹貯熱の解析には樹幹を円柱と見なした際の熱伝導方程式を適用する．

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

ここで， $T$ は温度， $t$ は時刻， $r$ は円柱の中心からの距離， $K$ は円柱の熱拡散係数 $K = \frac{\lambda}{c\rho}$ であり， $\lambda$ （W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）は熱伝導率， $c$ （J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）は比熱， $\rho$ （kg m<sup>-3</sup>）は密度を表す．

### 2.4. ヒノキの熱物理定数の導出

本研究においては，計算を行うためにヒノキの比熱，熱伝導率などを求めておく必要がある．これらの熱物理定数は組織構造に依存するため，本来は部位や生育状況によって異なる．そのため，正しくは実験的な手法によって対象森林におけるヒノキの部位や生育状況ごとの値を測定しなければならない．しかし，それらを高精度で測定するためには技術と労力を要する．そこで，Siau（1984）やSkaar（1988）が木材工学における実験データに基づいて，木材の比重や含水率から熱物理定数を計算する実験式を提示しているので，それらを利用した．そして，各定数は半径および高さ方向に一様であるとした．

まずヒノキの密度 $\rho$ ，乾燥密度 $\rho_0$ と含水比 $m$ を求めた．含水比（＝水分重/乾燥重量）は，生木の重量とその乾燥重量のデータから求めた．密度，乾燥密度については生木の重量，乾燥重量をその体積で除して求めた．

Skaar（1988）によれば，木材の比熱 $c_m$ （J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）は

$$c_m = \frac{c_0 + mc_w}{1 + m} + \Delta c_m \quad (4)$$

と表される．ここで， $m$ は木材の含水比， $c_w$ は水の比熱（＝4184 J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）， $\Delta c_m$ は吸湿性物質が吸水する際の放熱に関する補正項（＝335 J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）である．

ここで $c_0$ （J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>）は乾燥時の比熱であり，温度 $T$ （℃）に対する依存性を考慮して

$$c_0 = 1113 + 4.85T \quad (5)$$

と表される。

また, Siau (1984) によれば, 木材の熱伝導率 $\lambda_m$  ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) は

$$\lambda_m = [\rho_0(2.0 + 5.2m) + 238] \times 10^{-4} \quad \text{---(6)}$$

と表される。

以上の式から熱拡散係数 $K$ を求めた。この値が妥当かどうかは樹幹温度の実測値と計算値を比較して確認した。

## 2.5. 計算方法

本論文では, 測定木で検証された物理定数を用いて, 任意の太さの樹幹の貯熱を求め植物体貯熱量を推定する。このためには, 渡辺ら (1998) によりいくつかの方法がまとめられているが, ここでは表面温度をフーリエ変換して内部温度の解析解を求め, 樹幹表面における貯熱量を推定することにした。この方法は, 任意の半径をもつ樹木の貯熱量の時間変化が数式によって表現できるメリットがある。

まず, 表面温度を次のようにフーリエ変換する。

$$\begin{aligned} T_a(t, a) &= \bar{T}_a + G_1 \cos(\omega t + c_1) + G_2 \cos(2\omega t + c_2) \\ &+ \dots + G_j \cos(j\omega t + c_j) + \dots \quad \text{---(7)} \\ &= \bar{T}_a + \sum_j F_j \exp(ij\omega t) \end{aligned}$$

ここで,  $j$ はフーリエ変換の項数,  $\omega$ は温度変化の角振動数,  $i$ は虚数単位,  $F_j$ は表面温度の複素フーリエ変換である。(3), (7)式をもとに, 時刻 $t$ における半径 $a$ の円柱の中心軸からの距離 $r$ での温度 $T(t, r)$ が求まり,

$$T(t, r) = \sum_j \frac{J_0(\mu_j r)}{J_0(\mu_j a)} F_j \exp(ij\omega t) \quad \text{---(8)}$$

となる。ここで,  $J_0$ は0次の第1種ベッセル関数である。

次にこの $T(t, r)$ を表面( $r=a$ )で $r$ について偏微分することにより, 任意の半径 $a$ の円柱の単位長さあたりに円柱表面から内部へ向かう熱のフラックス $Q_s$  ( $\text{W m}^{-1}$ ) が計算でき,

$$Q_s = 2\pi a \lambda \sum_j D_j F_j \exp(ij\omega t) \quad \text{---(9)}$$

と表される。

$$D_j = -\mu_j \frac{J_1(\mu_j a)}{J_0(\mu_j a)} \quad \text{---(10)}$$

$$\mu_j = (-1+i) \sqrt{\frac{\omega_j}{2K}} \quad \text{---(11)}$$

である。ここで,  $J_1$ は1次の第1種ベッセル関数である。

$Q_s$ から一定面積の植物体貯熱量を求めるために, 実際の樹体を円柱の組み合わせとして表す。地際からおよそ2mずつ円柱を取って樹体を近似した。なお本研究では, (2)式における群落内空気貯熱 $Q_a$ とは別に植物体の貯熱を考えるのであるから周囲の温度と植物体の温度に差がなければ $Q_a$ と独立して貯熱を考える必要がない。このことを考慮し枝や葉の貯熱は無視した。

先の $Q_s$ を一定面積の植物体へと拡張するにあたって樹幹表面温度を知る必要があるが, ここでは水平方向には一様であるとする。また, 垂直方向には5.5m以下では1mの地点の実測値と等しく5.5m以上では10mの地点の実測値と等しいとした。

毎木調査の結果から全ての円柱の直径を求める。そして, 5.5m以上と5.5m以下について各円柱を半径で5cm刻みの階級に分け, その階級に含まれる円柱の長さの合計 $l(a)$ を求める。そして, 半径が0~5cmに含まれる円柱は全て半径が2.5cmであると見なし, 同様に5~10cmに含まれる円柱は全て半径が7.5cm...と見なし, 各々の階級(5.5m以下は $n$ 個, 5.5m以上は $m$ 個とする)について先の手法で $Q_s$ を計算する。プロットの面積を $S(\text{m}^2)$ としたとき, ヒノキ群落の植物体貯熱量 $Q_v$  ( $\text{W/m}^2$ ) は

$$Q_v = \frac{1}{S} \left( \sum_{k=1}^n Q_{\leq 5.5, k} l_{\leq 5.5, k} + \sum_{k=1}^m Q_{> 5.5, k} l_{> 5.5, k} \right) \quad \text{---(12)}$$

によって計算される。

## 3. 群落貯熱量の測定結果

### 3.1. バイオマス

毎木調査の結果, 樹種は上層についてはヒノキが主で, その他にアカマツやコナラ, コシアブラ, ウワミズザクラ等の広葉樹が少数存在し, 下層についてはヒサカキ, サカキ等が主であった。全体では樹木は519本で, 平均樹高は7.88m, 平均DBHは8.174cm, 胸高断面積合計は46.87 $\text{m}^2/\text{ha}$ であった。また, 幹材積の推定式(大畠(1995))を用いて樹高とDBHから蓄積を計算した結果, 378.9  $\text{m}^3/\text{ha}$ となった。

ヒノキのみについて求めたところ, ヒノキは224本で, 平均樹高は14.15m, 平均DBHは15.60cm, 胸高断面積合計は43.17 $\text{m}^2/\text{ha}$ であった。同じ推定式から蓄積は354.9  $\text{m}^3/\text{ha}$ となった。

### 3.2. 熱物理定数

測定木付近のヒノキ(樹高9.67m, DBH 7.5cm)を熱物理定数の測定に用いた。そのヒノキの乾燥重量が

10.782kg, 湿潤重量が21.268kgであったので, 含水比  $m=0.97255$  となる. また, その体積  $0.02506\text{m}^3$  から密度  $\rho=848.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 乾燥密度  $\rho_0=430.3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  となる.

これらを(4), (6)式に代入して, ヒノキの比熱  $c_m=3011\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , ヒノキの熱伝導率  $\lambda_m=0.3274\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  が得られた. これらの値を用いてヒノキの熱拡散係数  $K=1.28\times 10^{-7}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  が導かれた.

### 3.3. 気温と樹幹温度の実測値

気温・樹幹温度は2001年9月5日から連続測定しているが, 本研究では代表として晴天の続いた11月9日~11日の値を用いた. 晴天時のデータを用いたのは, 晴天以外では温度変化が小さく植物体貯熱量があまり発生しないからである. 図-1に11月9日~11日の高さ10mにおける樹幹付近の気温, 樹幹表面温度(0cm), 深さ1cm, 2.5cm, 6cmの樹幹温度を, 図-2に高さ1mにおける樹幹付近の気温, 樹幹表面温度(0cm), 深さ1cm, 2.5cm, 6cmの樹幹温度を示す. 樹幹温度は, 内部ほど位相が遅れ日較差(以下単に較差とする)が小さいことが分かる. また, 気温に比べ樹幹温度は細かい変動が少なかった.

### 3.4. 熱拡散係数の最適化

3.2節で求めた熱拡散係数  $K$  が妥当かどうかを確認するために,  $K$  の値を変えていったときの樹幹内部温度の再現状況を調べた. 図-3, 4は  $K$  の値を変えていったときに高さ1mの樹幹内部温度を計算し, 深さに対する位相・振幅の変化を調べたものである. まず, 各温度をフーリエ変換し日周期のみ取り出した. 位相としては(7)式の  $c_j$  (日周期のもの)を用いて樹幹表面温度の位相と各深さの温度の位相の差を求め, 時間で表したものを取った. 振幅としては(7)式の  $G_j$  (日周期のもの)を取った.

図-3, 4から熱拡散係数  $K$  が大きいほど位相の遅れが少なく, 振幅の減衰も小さいことが分かる. また, 図-3, 4において  $K=1.28\times 10^{-7}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  を用いた計算値の位相と振幅の変化は実測値のものとほぼ一致している. よって, 3.2節で得られた熱拡散係数を以降の計算に使用した.

この  $K$  の値を用いて2.5節の方法を適用し, 樹幹内部温度の計算値を示した. 図-5が10mの値(代表として深さ6cmの温度), 図-6が1mの値(代表として深さ6cmの温度)である. 実測値と計算値の  $R^2$  値は, 10mでは  $R^2=0.9923$ , 1mでは  $R^2=0.9835$  であった. 夏季や冬季について計算しても  $R^2=0.98$  程度の精度で樹幹内部温

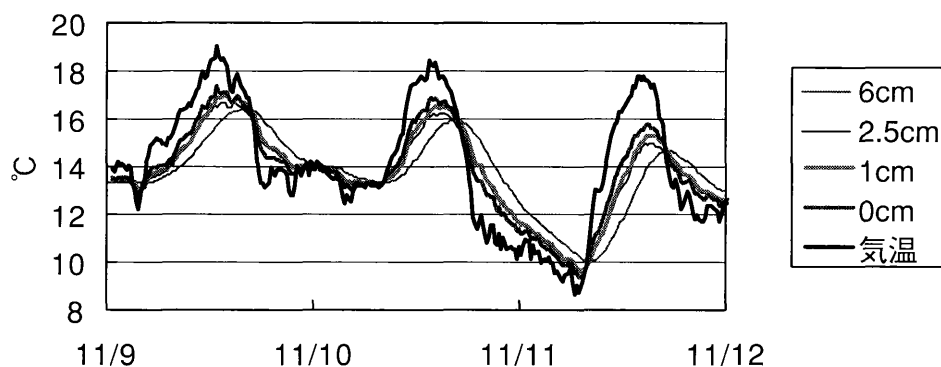


図-1 高さ10mにおける気温と樹幹温度(深さ0cm, 1cm, 2.5cm, 6cm)の変化

Fig-1 Variations of air temperature and stem temperature of the depth of 0, 1, 2.5, 6cm at the 10m height.

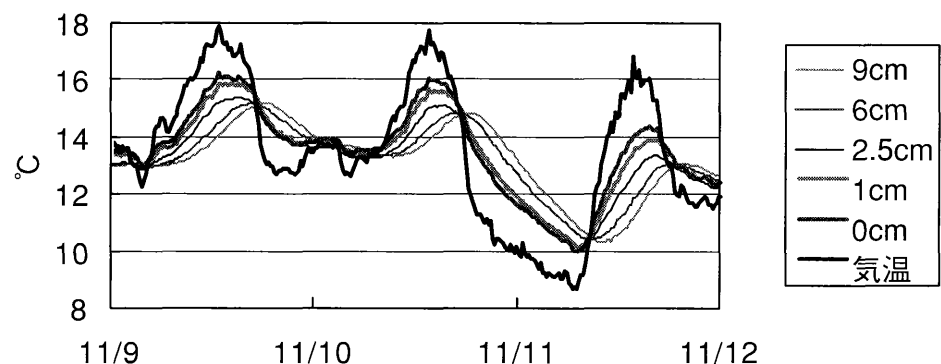


図-2 高さ1mにおける気温と樹幹温度(深さ0cm, 1cm, 2.5cm, 6cm, 9cm)の変化

Fig-2 Variations of air temperature and stem temperature of the depth of 0, 1, 2.5, 6, 9cm at the 10m height.

度を推定できることが分かった。このことから、樹幹の熱拡散係数が一定であるとして樹幹貯熱量を熱伝導方程式で解析することは妥当であると言える。

### 3.5. 植物体貯熱量の評価

植物体の貯熱量 $Q_v$ と、植被層内大気の見熱貯熱量 $Q_a$ 、植被層内大気の潜熱貯熱量 $Q_w$ 、土壌内の貯熱量 $Q_g$ を計算し、11月11日のものを図-7に示した。植物体貯熱量 $Q_v$ の較差はおよそ $25\text{W/m}^2$ である。夏季・冬季のデータを用いて計算しても $Q_v$ の日変化幅は約 $25\text{W/m}^2$ であったが、気温が上昇傾向にあるときはグラフにおいて $Q_v$ がプラス側にずれ、減少傾向にあるときはマイナス方向にずれる。 $Q_v$ は位相が気温よりかなり前にずれ、午前10時頃（気温の約4時間前）にピーク値をとる。

$Q_v$ の較差は埼玉県川越市の落葉広葉樹林においては着葉期で $40\text{W/m}^2$ （広田ら（2001））であり、アマゾンのマナウスにおいては $30\text{W/m}^2$ （Mooreら（1986））、マレーシアのパソーでは $40\text{W/m}^2$ （大谷（1996））である。

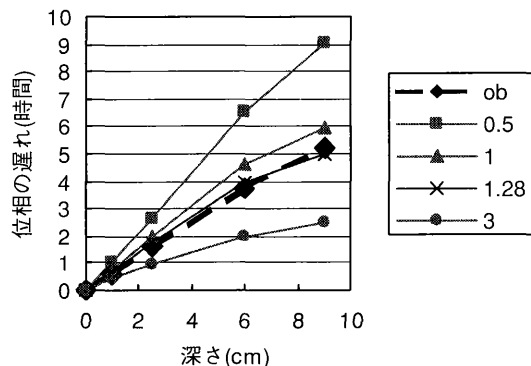


図-3 熱拡散係数 $K$  ( $0.5, 1, 1.28, 3(\times 10^{-7})\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) に対する深さと位相の関係

Fig-3 Relationships of the phase of daily variations to the stem depth for the thermal diffusivity of  $0.5, 1, 1.28$ , and  $3(\times 10^{-7})\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

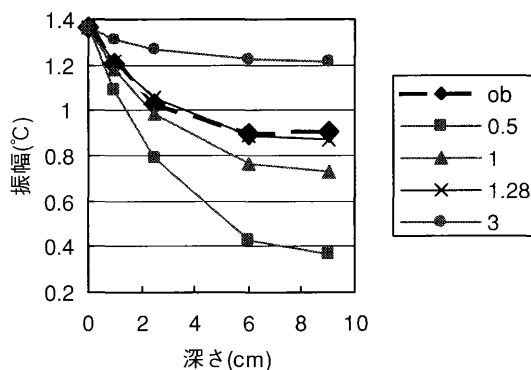


図-4 熱拡散係数 $K$  ( $0.5, 1, 1.28, 3(\times 10^{-7})\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) に対する深さと振幅の関係

Fig-4 Relationships of the amplitude of daily variations to the stem depth for the thermal diffusivity of  $0.5, 1, 1.28$ , and  $3(\times 10^{-7})\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

川越やパソーに比べて桐生のヒノキ林の値は小さい傾向がある。パソーとの違いについては $DBH$ 、樹高に起因すると考えられる。例えば、平均 $DBH$ は桐生では $15.60\text{cm}$ であったのに対し、パソーでは約 $30\text{cm}$ であり大きく異なる。つまり、植物体貯熱量は樹幹の半径が大きいほど、樹高が高いほど大きくなるため、このような差が生じたと推察される。また、マナウスにおいても桐生

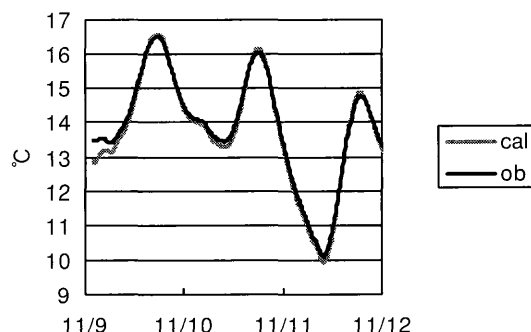


図-5 高さ10mにおける深さ6cmの樹幹温度の実測値 (ob) と計算値 (cal)

Fig-5 A comparison between measured and calculated value of stem temperature at the 10m height.

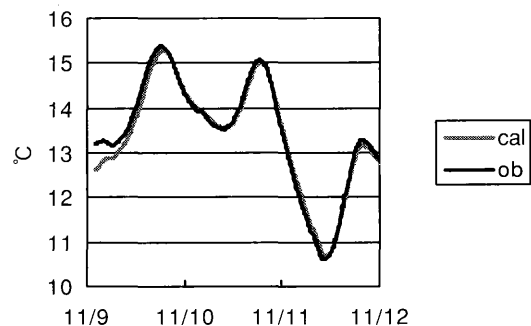


図-6 高さ1mにおける深さ6cmの樹幹温度の実測値 (ob) と計算値 (cal)

Fig-6 A comparison between measured and calculated value of stem temperature at the 1m height.

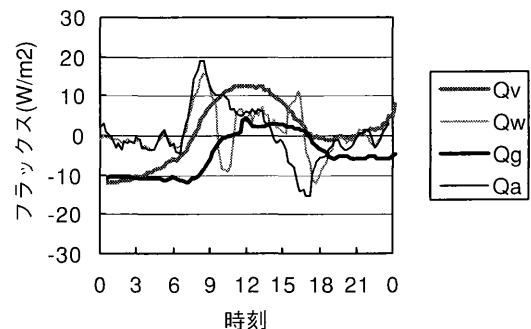


図-7 2001年11月11日における群落内の植物体貯熱( $Q_v$ )、顕熱貯熱( $Q_a$ )、潜熱貯熱( $Q_w$ )、土壌の貯熱( $Q_g$ ) ( $\text{W/m}^2$ ) の変化

Fig-7 The daily variations of biomass heat storage( $Q_v$ ), sensible heat storage( $Q_a$ ), latent heat storage( $Q_w$ ) and soil heat storage( $Q_g$ ) on November 11, 2001.

よりDBH, 樹高の大きい樹木が存在するが, 植物体貯熱量の計算にDBH > 15cmの樹木のみ用いているので大きな差が生じなかったと推察される. しかし, 埼玉県川越市については平均DBHは11.8cm (渡辺ら (2002)) とむしろ桐生よりも小さく, 樹高もほぼ同じであったため, 樹幹のバイオマスの違いが原因ではないと考えられる. これは川越では, 林内気温の較差が桐生より大きいこと, 枝の貯熱量も考慮していることなどによると思われる.

純放射 $R_n$ , 顕熱フラックス $H$ , 潜熱フラックス $IE$ , 群落貯熱量 $G$ の変化を図-8に示した. これらについては11月11日のものを示した.

熱収支の各項を見ると,  $R_n$ ,  $H$ ,  $IE$ ,  $G$ の較差は各々, およそ480 W/m<sup>2</sup>, 200~300 W/m<sup>2</sup>, 200~300 W/m<sup>2</sup>, 60 W/m<sup>2</sup>であった. 純放射量の変化幅に対する植物体貯熱量の割合と群落貯熱量全体の割合を調べるために  $\frac{Q_v}{R_n} \times 100$  (%),  $\frac{G}{R_n} \times 100$  (%) を求めると, 各々約5%, 12%となった. 埼玉県川越市においては純放射量の変化幅に対する植物体貯熱量の割合は約5% (広田ら (2001)) であり, アマゾン川流域のマナウスにおいては3~5% (Mooreら (1986)) であった.  $Q_v$ も含めた $G$ の値を与えても $H + IE$ の値は $R_n - G$ には達さないことが多く, 熱収支のインバランス問題にはまだ他の要因も大きいと考えられる.

ただし,  $Q_v$ の計算に関してはいくつか問題点もある. 1点の測定木において2点の高度のみで実測を行ったこと, バイオマスとしてヒノキの幹のみを考えたこと, 樹幹の熱拡散係数を定数としたことなどである. 本研究ではおおよその寄与を評価することを目的としたためこれらを考慮しなかったが, より正確な値を求めるには樹幹温度の高さ方向の把握, 他の樹木や太枝の貯熱量の加算, 季節ごとの熱拡散係数の最適化などを行う必要がある.

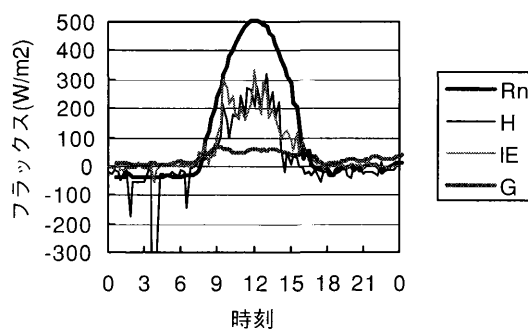


図-8 2001年11月11日における純放射量( $R_n$ ), 顕熱フラックス( $H$ ), 潜熱フラックス( $IE$ ), 群落貯熱量( $G$ ) (W/m<sup>2</sup>) の変化  
Fig-8 The daily variations of net radiation( $R_n$ ), sensible heat flux( $H$ ), latent heat flux( $IE$ ) and the total heat storage( $G$ ) on November 11, 2001.

#### 4. 植物体貯熱量の簡易推定

気象データから植物体貯熱を推定するパラメータ化手法として, 植物体の熱伝導を解析するが植物体温度を測定せず, 林内気温から植物体表面温度を推定して貯熱を計算する手法, より一般的に樹冠上方の参照高さ (reference height) の気温から植物体貯熱を推定する手法を提示する.

##### 4.1. 林内気温からの樹体表面温度測定

樹幹の表面温度の実測は, 熱電対を樹皮下に固定して測定するため気温の測定のように簡易ではない. 樹幹表面温度を計算で求めるにも, 樹幹付近の空気から樹皮下への熱伝導を考えるのは困難である. そのため推定式が必要となる. 図-1, 2において樹幹表面温度は, 同じ高さの林内気温変化に比べて位相が遅れ較差が小さくなるような変化を示すことが分かる. この変化は樹幹温度が内部ほど位相が遅れ, 較差が小さくなる変化と類似している. そこで仮に樹幹半径を実際より大きく取り, 林内気温を樹幹表面温度として与え, 樹幹内部温度の推定と同様の方法で樹幹表面温度を求めるという方法により樹幹表面温度の推定を行った.

11月9日~11日の高さ10mにおける値を用いて, 樹幹表面温度の推定値と実測値の2乗平均値が最も小さくなるように仮想半径を最適化したところ, 高さ10mの仮想半径は0.098mとなった. この仮想半径を用いて夏季・冬季についても計算したところ,  $R^2 = 0.95$ 程度に樹幹表面温度を再現できた. そこで, 同期間について林内気温から推定した樹幹表面温度を用いて求めた群落貯熱量 $Q_v'$ も求め, 樹幹表面温度実測値を用いて求めた $Q_v$ と比

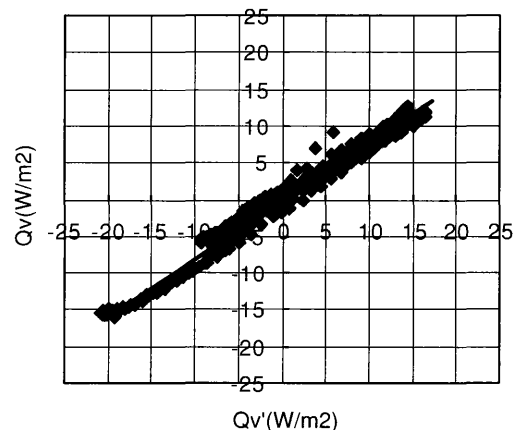


図-9 樹幹表面温度の実測値と推定値から求めた植物体貯熱量の比較

Fig-9 Comparisons of biomass heat storage values calculated from the measured stem-surface temperature with those from the stem-surface temperature estimated using in-forest air temperature.

較した(図-9)が、推定値を用いても $R^2 = 0.9807$ と $Q_v$ に近い値になった。

#### 4.2. 樹冠上の気温からの群落貯熱簡易推定

さらに一般気象観測からの実用的測定手法として樹冠上の気温変化から近似式で直接植物体貯熱を求める方法も考えられる。一般に、植物体貯熱量 $Q_v$ の推定式として

$$Q_v = aM_{veg}\delta T_b \quad (13)$$

がある。 $a$ は定数、 $M_{veg}$ は植生の重量、 $\delta T_b$ は植生温度の1時間ごとの変化である。

測定地が同じならば $M_{veg}$ もほぼ等しい。また、植物体の温度は気温から推定可能である。よって、(13)式は結局、

$$Q_v = a\delta T' \quad (14)$$

と表される。 $a'$ は $M_{veg}$ も含めた定数、 $\delta T'$ は $T$ を $Q_v$ の位相に合わせるために位相を前へずらした(一定時間前の)気温の変化である。

11月10日について、(14)式のような、気温から桐生のヒノキの植物体貯熱量 $Q_v$ を推定する近似式を作成したところ

$$Q_v = 11.4 \frac{\Delta T_{t-2.5}}{\Delta t} \quad (15)$$

が得られた。 $\frac{\Delta T_{t-2.5}}{\Delta t}$ は2.5時間前の1時間の樹冠上(高

さ20m)気温変化を意味する。ただし、ここでは樹冠上気温にフーリエ変換を行い日周期のみを取り出したもの

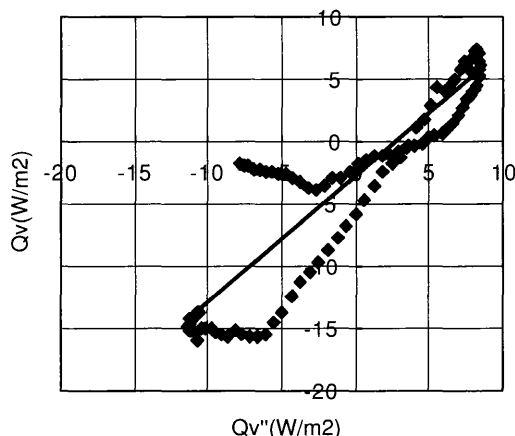


図-10 2001年11月10日における計算による植物体貯熱量と近似式による植物体貯熱量の比較

Fig-10 Comparisons between the biomass heat storage values calculated from stem surface temperature and approximately estimated from the air temperature above forest on November 10, 2001.

を用いた。(15)式による植物体貯熱量を $Q_v''$ とし、図-10で $Q_v$ と比較したところ $R^2 = 0.8184$ であった。ループを描くという問題点があるが、この式により植物体貯熱の大まかな推定は可能である。しかし、日周期以外の変化が卓越するような場合は、 $Q_v$ から外れるという問題点がある。なお、(15)式で2.5時間前の樹冠上気温変化を用いたのは位相を合わせることで図-10におけるループをできるだけ小さくするためである。

本研究では係数は11.4となり、アマゾン川流域のマナウスにおける12.6(Mooreら(1986))とマレーシアのパソーにおける11.6(大谷(1996))と同程度だった。

#### 5. まとめ

最初に樹幹温度の実測を行い、樹幹内部の温度変化の特徴を知ることができた。次に樹幹に円柱熱伝導の理論を適用することで、樹幹表面温度から樹幹内部温度の推定を行った。樹体の熱拡散係数 $K$ を最適化した上で樹幹表面温度を与え解析的手法により、樹幹内部温度はかなり良好に再現できることが確認できた。そこで、樹幹の貯熱量を求め、その方法を群落全体へと拡張することで植物体貯熱量 $Q_v$ の推定を行った。熱収支における植物体貯熱量 $Q_v$ 、あるいは群落貯熱量 $G$ の熱収支に対する寄与が明らかになった。その結果、 $Q_v$ の較差はおよそ $25\text{W/m}^2$ であり、純放射量に対する植物体貯熱量の割合は5%であった。 $Q_v$ の較差は埼玉県川越市、パソーにおける研究例より小さく、マナウスにおける研究例と同程度だった。 $Q_v$ の違いを生む主な原因はバイオマスであると考えられるが、川越との比較から気温の較差も考えられる。 $Q_v$ も含めた $G$ の値を与えても $H+LE$ の値は $R_n-G$ には達さないことが多く、熱収支のインバランス問題にはまだ他の要因も大きいことが分かった。

また、気温から樹幹表面温度を推定する方法を使えば気温からおおよその $Q_v$ の推定が可能であることが分かった。そして、気温から植物体貯熱量を求める式を作成したところ、マナウスやパソーにおける式の係数と同程度だった。この式は日周期以外の変化が大きい場合には適用できず、この点は今後の課題である。

本研究を進めるにあたり、森林総合研究所の渡辺力氏と大谷義一氏には貯熱解析手法等について御教示頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 引用・参考文献

- 1) Baldocchi,D., Valentini,R., Running,S., Oechels,W. and Dahlman,R.(1996): Strategies for measuring and modeling



- carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.*, **2**, 159-168
- 2) C.J.Moore・G.Fisch(1986) : Estimating heat storage in Amazonian tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **38**, 147-169
- 3) 広田知良・福本昌人・渡辺力 (2001) : 地中熱流量と水体・森林貯熱量, 気象研究ノート, **199**, 141-151
- 4) 近藤純正・中園信・山崎剛・桑形恒男 (1991) : 森林樹体の貯熱量の推定. 天気, **38**, 123-127
- 5) 大畠誠一 (1995) : 森林の現存量推定法の検討—伐倒によらない推定法—
- 6) 大谷義一 (1996) : 乱流フラックス観測と群落貯熱量の推定, 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究 平成5年度~平成7年度 第1章第2節, 24-37
- 7) 大谷義一・渡辺 力・山野井克己・溝口康子・岡野通明・谷 誠・安田幸生 (1997) : 落葉広葉樹林における群落貯熱量の観測. 日本農業気象学会講演要旨, A21
- 8) Siau,J.F.(1984) : Transport processes in wood. Springer-Verlag, Berlin, pp.245.
- 9) Skaar,C.(1998) : Wood-water relations. Springer-Verlag, Berlin, pp.283.
- 10) 田中克典・小杉緑子・大手信人・小橋澄治・中村彰宏 (1998), 日本生態学会誌 (Japanese Journal of Ecology), **48**, 265-286
- 11) 矢野雅人 (2002), 京都大学修士論文
- 12) 渡辺力・大谷義一 (1998) : 樹幹熱伝導の計算手法に関する考察. 農業気象, **54**, 47-54.
- 13) 渡辺力・大谷義一 (2002) : 未発表データ